



厦门大学学报(自然科学版)  
*Journal of Xiamen University(Natural Science)*  
ISSN 0438-0479,CN 35-1070/N

## 《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 大亚湾及周边海区潮流和余流的季节变化特征  
作者: 孙振宇, 陈照章, 杨龙奇, 朱佳  
收稿日期: 2019-04-26  
网络首发日期: 2019-07-31  
引用格式: 孙振宇, 陈照章, 杨龙奇, 朱佳. 大亚湾及周边海区潮流和余流的季节变化特征. 厦门大学学报(自然科学版).  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20190731.0827.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 大亚湾及周边海区潮流和余流的季节变化特征

孙振宇<sup>✉</sup>, 陈照章, 杨龙奇, 朱佳

(近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361102)

✉通信作者 sunzy@xmu.edu.cn

**摘要** 通过对大亚湾及其周边海区冬、夏两季和大潮、小潮多站位的海流观测, 分析了调查海区潮流、余流的分布特征和季节变化。结果显示: 大亚湾及周边海区较小的潮差导致冬季和夏季整体实测海流较弱, 夏季潮差和潮流略大于冬季。大潮期间部分站位表现出明显的潮流涨、落的特征, 但小潮期间在余流和其他因素的掩盖下涨潮流和落潮流不明显。该海区潮流振幅最强的分潮为  $M_2$  分潮, 而  $K_1$ 、 $O_1$ 、 $S_2$  分潮振幅较弱, 所有站位的潮流性质基本上都表现为不正规半日潮流, 大多数站位的潮流运动形式主要表现为往复流。冬季大亚湾湾内的余流虽然流速较弱, 但余流的流向体现出的反气旋结构明显且稳定。大亚湾湾口和惠东以东沿岸海区的余流受季节和天气过程影响显著, 夏季期间台风或其他因素造成的天气过程可以使余流整体转向。

**关键词** 大亚湾; 潮流; 余流; 季节变化

中图分类号 P 731.21

文献标志码 A

DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.201904030

## Seasonal variation of the tidal current and residual current in the Daya Bay and its surrounding area

SUN Zhenyu<sup>✉</sup>, CHEN Zhaozhang, YANG Longqi, ZHU Jia

(State Key Laboratory of Marine and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract** Based on in-situ current observation at multiple stations in the Daya Bay and its surrounding area in summer and winter during spring and neap tide, we analyzed the characteristics and seasonal variation of the tidal current and residual current. The relatively small tidal amplitude of sea level leads to weak tidal current in the study area. Observed current is slightly stronger in summer than that in winter. During spring tide, some of the stations have clear rising and ebbing current, while during neap tide, the rising and ebbing currents are not noticeable due to residual current and other factors. The  $M_2$  tidal component has larger amplitude than  $K_1$ ,  $O_1$  and  $S_2$  components. Most of the stations exhibit irregular semi-diurnal tide and alternating current. The residual current in winter is relatively weak, while has a stable anti-cyclonic structure. The residual current at the mouth of the Daya Bay and east of Huizhou coastal areas is subject to influence by seasonal variation and weather processes. Typhoon passages and other weather processes in summer could largely reverse the direction of residual current.

**Key words** Daya Bay; tidal current; residual current; seasonal variation

大亚湾位于我国广东省东部沿海, 东靠红海湾, 西邻大鹏湾, 东西宽度 13~25 km, 南北纵深 26 km, 水深 5~18 m, 沿岸无大河流注入<sup>[1]</sup>。大亚湾海区自然环境优越且生物资源丰富, “大亚湾水产资源自然保护区”和“惠东海龟国家级自然保护区”都坐落于此, 是我国多种经济鱼类生长发育的场所和重要鱼类物种种质资源库。然而作为广东省重点开发区之一, 随着大亚湾核电站和岭澳核电站的相继建成和投入运行, 沿岸石化工业园区规模的不断扩大, 加之湾内水产养殖和污水排放等人类活动的影响, 大亚湾及其周边海区水体的环境保护和可持续发展受到严重的挑战<sup>[2-3]</sup>。因此有必要对大亚湾及周边海区的潮流、余流等水动力环境进行观测和研究, 了解湾内与外海水体的交换速率及湾内海水的自净化能力, 为改善该海域水质和生态环境提供必要的科学依据。

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(41776027); 惠州市海洋渔业资源环境调查项目(F2017-01-1); 厦门大学校长基金(20720180103)

网络首发时间: 2019-07-31 08:34:23 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20190731.0827.002.html>

关于大亚湾及周边海区潮流和余流的观测研究和数值模拟, 早期研究已经有较丰富的成果: 杨国标<sup>[4]</sup>分析了 1996—1999 年 3 次大型水文测验所获得的水文资料, 得出大亚湾的潮流既有天文潮的一般规律, 又有外海潮波受地形、水深等因素影响造成的浅海潮流的特点, 潮流性质属不正规半日潮, 运动形式以往复流为主, 浅水效应明显, 湾口潮流强于湾顶。吴仁豪等<sup>[5]</sup>用三维陆架海模式对大亚湾海域的潮汐、潮流和余流进行了数值模拟研究, 结果表明大亚湾海域的潮流性质以不正规半日潮为主, 水平潮流具有明显的往复流性质, 主要呈南北方向, 落潮流速比涨潮流速大。夏季湾口余流大体流向湾外, 冬季湾口余流大体流向湾内。李立等<sup>[6]</sup>在 1986—1987 年的大亚湾海洋生态零点调查项目中, 利用 3 个站位锚系潜标的观测数据揭示出大亚湾冬、夏季受不同形式的环流支配, 冬季主要表现为反气旋式的水平环流, 夏季则主要表现为垂直环流。Zhang 等<sup>[7]</sup>利用一个嵌套的海洋模型和颗粒追踪的方法, 揭示出大亚湾外部的沿岸流对湾内外水体交换速率有显著影响, 导致夏季大亚湾上层海水的停留时间明显短于冬季。

上述研究除数值模拟类的成果之外, 现场观测的资料大都已经年代较久, 且其在站位布设和层位设置上都较为稀疏。因此, 厦门大学于 2018 年 1 月和 7 月分别开展了大亚湾及周边海区冬季航次和夏季航次的海洋水动力调查, 设置了 12 个定点观测站覆盖整个海区, 时间跨度上覆盖冬季和夏季的大潮和小潮期。本文中主要依据此次调查获得的海流观测资料研究该海区潮流和余流的空间分布和季节变化, 并分析其驱动机制。

## 1. 数据和处理方法

2018 年 1 月和 7 月, 在大亚湾及其湾口和惠东以东近海布设了 12 个海流定点测站 (C01~C12, 图 1, 表 1), 通过 6 条调查船分批次采用声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 对所有站位在大潮、小潮期进行准同步周日定点观测, 每个周日观测时间不少于 25 h。用于海流剖面观测的 ADCP 仪器分别为 RDI WorkHorse 300K 型 (流速精度 2 cm/s)、600K 型 (流速精度 2 cm/s)、LinkQuest FlowQuest 600K 型 (流速精度  $0.25\% \pm 2.5$  mm/s)、1000K 型 (流速精度  $0.25\% \pm 2.5$  mm/s)。各台 ADCP 均悬挂于船侧水面以下 1m 处向下观测, 设置采用 ENU 坐标系, 采样时间间隔为 10 min, 剖面垂直层间隔为 0.5 m。ADCP 剖面数据根据声学回波强度计算海底所在层位, 去除表层和底层盲区无效数据, 并将各层数据进行深度层位标准化, 最终获取近表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、近底层共 6 个标准层位的海流数据, 其中 H 为即时水深。由于 12 个测站的作业需要分两批次先后完成, 因此观测日期无法全部保证在大潮日或小潮日 (部分站位需提前或推后 1~2 d)。

表1 2018年冬季航次和夏季航次定点海流观测站位和观测时段  
Tab.1 Observation stations and survey period in winter and summer cruises of 2018

站位	经度°E	纬度°N	水深/m	冬季大潮	冬季小潮	夏季大潮	夏季小潮
C01	114.5843	22.4628	21	01/17-01/18	01/22-01/23	07/12-07/13	07/06-07/07
C02	114.6042	22.5812	14	01/17-01/18	01/25-01/26	07/16-07/17	07/06-07/07
C03	114.6303	22.6721	7	01/17-01/18	01/25-01/26	07/16-07/17	07/06-07/07
C04	114.6307	22.7365	7	01/17-01/18	01/25-01/26	07/16-07/17	07/06-07/07
C05	114.7253	22.7472	7	01/18-01/19	01/25-01/26	07/16-07/17	07/07-07/08
C06	114.7010	22.6718	10	01/18-01/19	01/25-01/26	07/16-07/17	07/07-07/08
C07	114.6976	22.5821	16	01/18-01/19	01/25-01/26	07/16-07/17	07/07-07/08
C08	114.7122	22.4613	24	01/17-01/18	01/22-01/23	07/12-07/13	07/06-07/07
C09	114.7816	22.4832	23	01/17-01/18	01/22-01/23	07/12-07/13	07/06-07/07
C10	114.8758	22.5219	16	01/18-01/19	01/22-01/23	07/12-07/13	07/07-07/08
C11	114.9384	22.5798	20	01/18-01/19	01/22-01/23	07/12-07/13	07/07-07/08
C12	115.0141	22.6446	15	01/18-01/19	01/22-01/23	07/12-07/13	07/07-07/08

另外, 利用航次同期观测的潮位资料, 辅助进行潮时的分析和判定。冬季航次和夏季航次分别于 1 月—5 月、5 月—7 月在 T03 站 (图 1) 布设了潮位定点观测站, 潮位观测持续时间均大于 1 个月,

覆盖定点海流观测的时段。T03 站潮位观测在冬季和夏季分别使用的仪器为 RBR TDR-2050 潮位仪（精度为 0.025 dBar）及 Keller DCX-22 潮位仪（精度为 0.01 dBar），采样间隔设置为 1 min 或 5 min。

为了解冬季航次和夏季航次大潮、小潮观测期所处的天气环境，本文中使用了 Remote Sensing System 提供的 ASCAT 卫星遥感海面风场资料<sup>[8]</sup>。该资料提供海面上空 10 m 处的风速和风向网格化数据，空间水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率有日平均、3 日平均、周平均、月平均 4 种，本文中采用 3 日平均的资料。

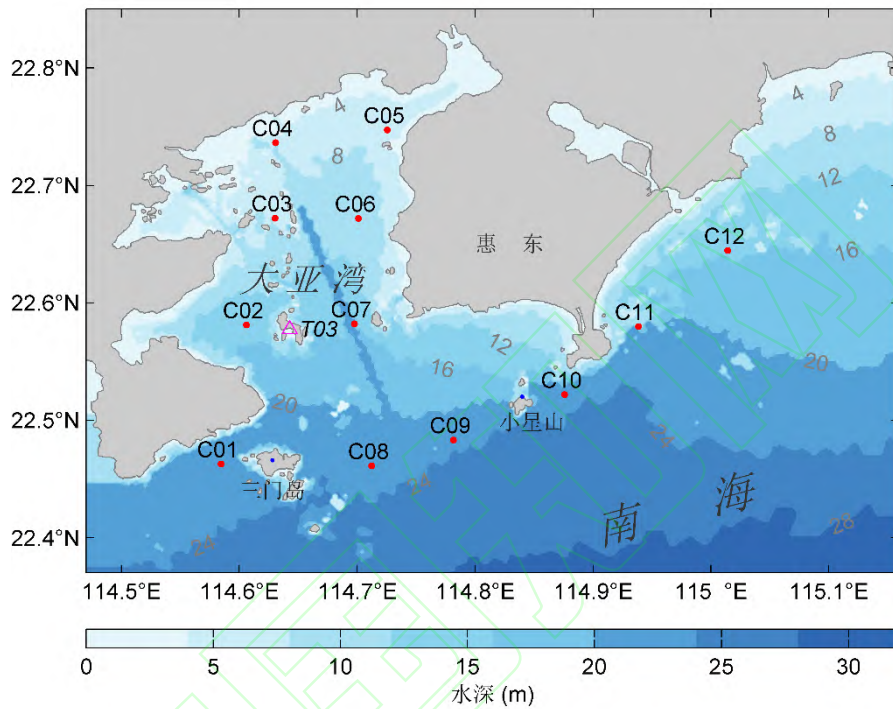


图 1 大亚湾及周边海区地形图（地形数据来源于海军航保部海图）以及 2018 年冬季和夏季航次定点海流观测站位（红点）和定点连续潮位观测站（紫色三角）

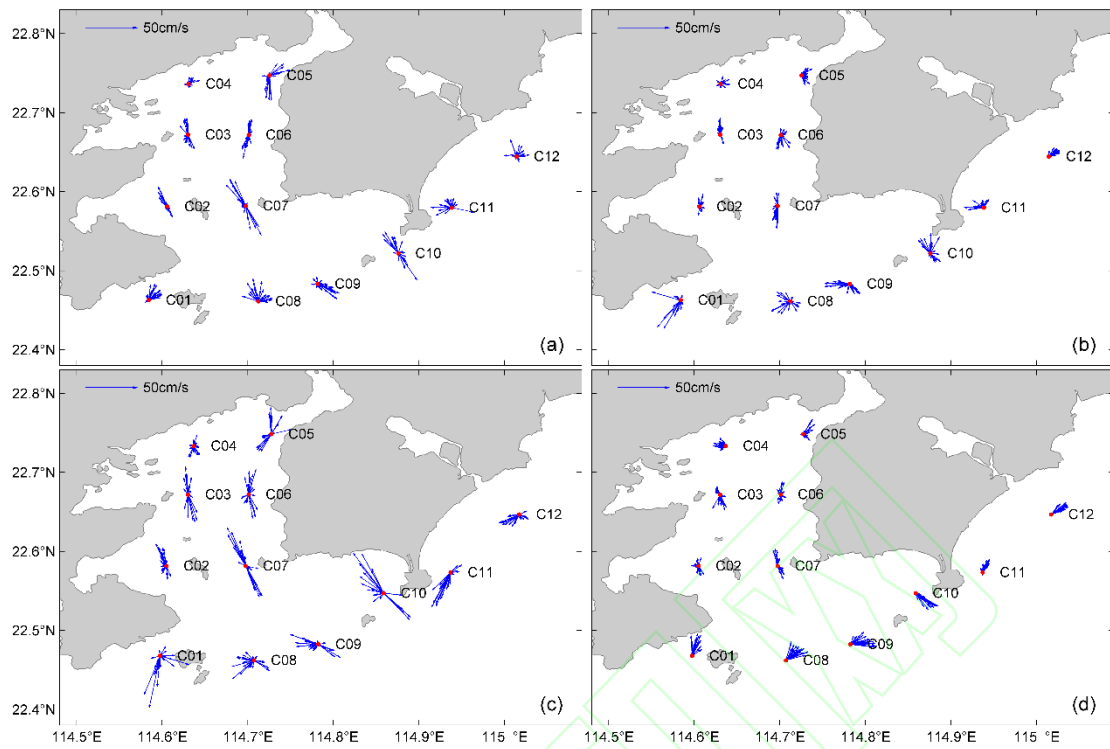
Fig. 1 Bathymetry map of the Daya Bay and its surrounding area (Data from nautical chart by China Navy), denoted with current observation stations (red dots) and tidal level observation station (purple triangle) in winter and summer cruises of 2018

## 2 结果与分析

### 2.1 实测海流分布特征

根据冬季和夏季两个航次定点海流观测的资料，整理得出各站位深度平均的整点实测流数据，并绘制出两个航次大潮、小潮期实测流平面玫瑰图（图 2），用以分析实测流的分布特征和时间变化。





(a): 冬季大潮; (b): 冬季小潮; (c): 夏季大潮; (d): 夏季小潮。

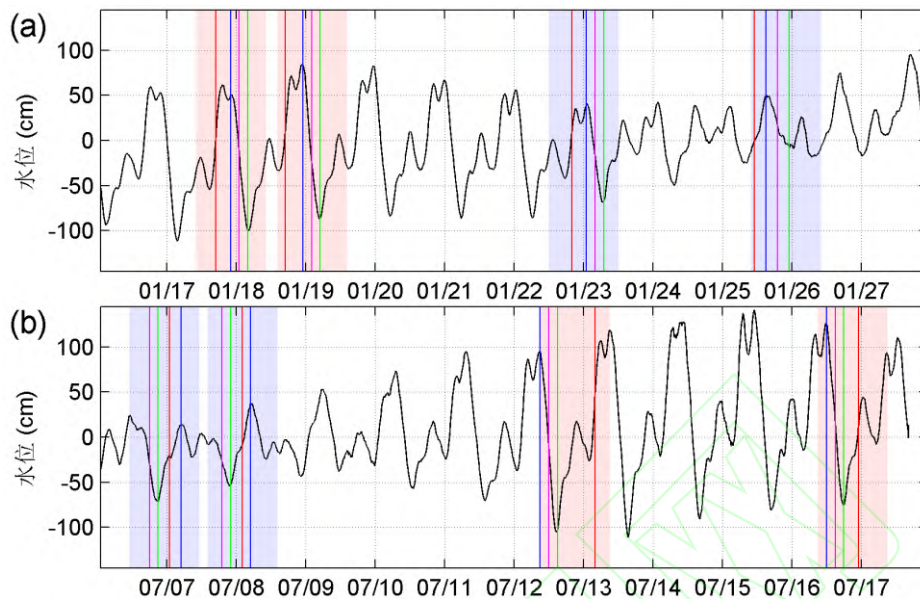
图2 大亚湾冬季和夏季各站位深度平均的实测海流平面玫瑰图  
Fig. 2 Rose map of depth-averaged current in the Daya Bay in winter and summer

冬季航次大潮期间,湾内的 C02、C03、C05、C06、C07 站位实测流表现出明显的往复性,实测流向集中分布在向北和向南两个方向;只有靠近湾顶的 C04 站位处在实测流很弱的区域,流向比较分散。湾口的 4 个站位中,只有 C10 站位实测流表现出明显的往复性;其余 C01、C08、C09 站位实测流向集中分布在偏东或偏北方向。惠东以东沿岸的 C11、C12 站位实测流则表现出较强的旋转性,流向比较分散。冬季航次小潮期间,各站位实测流显著减小。湾内的 6 个站位中只有 C07 站仍然表现出较明显的往复性;湾外的 6 个站位中 C08、C10 站实测流表现出较强的旋转性,流向比较分散;其余 C01、C09、C11、C12 站流向集中分布在偏西或偏东北方向。

夏季航次大潮期间,观测海区的实测流相对冬季整体有所增强。湾内的 6 个站位中, C02、C03、C05、C06、C07 站位实测流仍然保持明显的往复性,方向集中在向北和向南; C04 站位仍处于弱流区,流向也比较分散。湾口的 4 个站位中 C08、C09、C10 实测流都表现出了较强的往复性,其中 C10 站位的实测流沿着小星山与大陆之间的水道, C08、C09 站位的流向则基本为东—西方向。惠东以东的 C11、C12 站位的实测流主要沿岸流向西南。夏季航次小潮期间,所有站位实测流有明显的减弱,实测流的往复性均不明显,只有湾内的 C07 站涨、落潮流向与大潮期间一致。特别显著的变化是湾外的 6 个站位实测流向均为偏东向或偏东北向。

为确定各站位实测潮流的高潮、低潮、涨急、落急 4 个时刻的实测流特征,利用 T03 潮位站同期观测的潮位资料确定冬季航次和夏季航次大潮、小潮期间高潮、低潮、涨急、落急的具体时间。高潮和低潮时刻由潮位曲线极大值和极小值确定,而涨急和落急时刻为相邻的高潮和低潮时刻的中间时刻。从冬季和夏季在大亚湾及其周边海区布设的 14 个潮位站观测数据可知,该海区各站位涨潮和落潮的时间较为接近,因此以大亚湾中部的 T03 站位潮位资料确定的高、低、涨、落 4 个时刻具有整个海区的代表性。图 3 是冬季和夏季航次期间 T03 潮位站实测潮位过程曲线,由图可知该站位冬季大潮期间潮差约为 180 cm,小潮期间则减小为 80 cm 左右;夏季潮差有所增大,大潮期间潮差约为 220 cm,小潮期间则仍减小为 80 cm 左右。由此可见,大亚湾海区冬季和夏季整体潮差较小,尤其是小潮

期间更是如此。

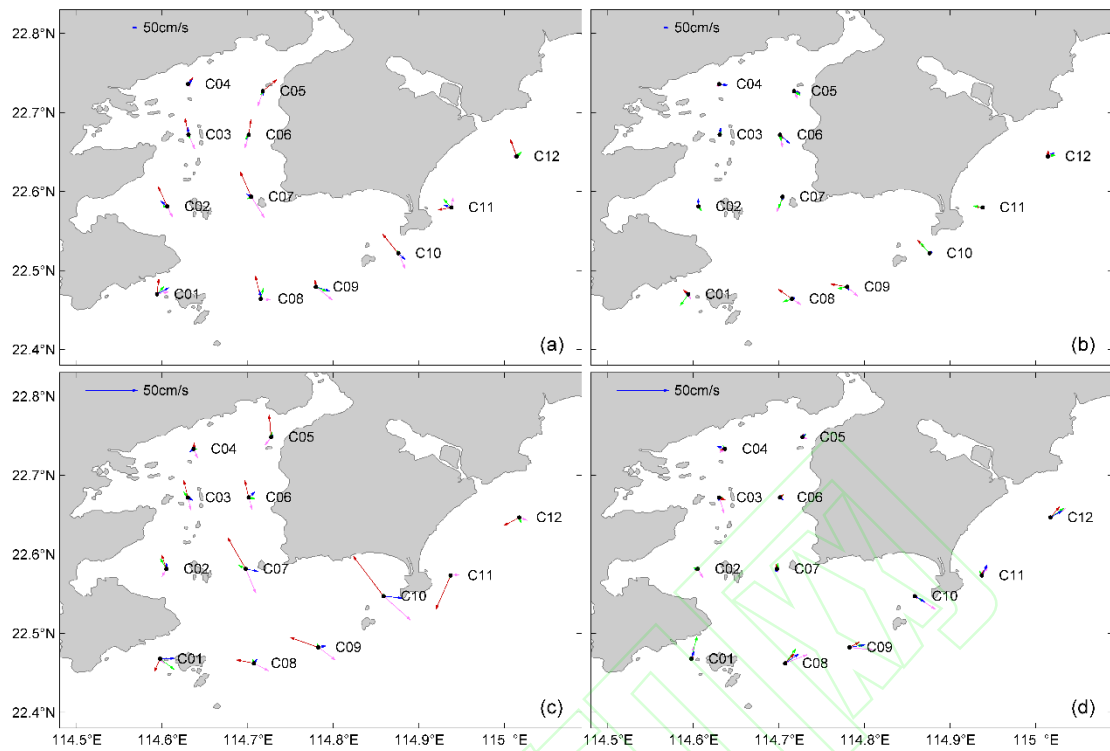


红色阴影：大潮观测期；蓝色阴影：小潮观测期。蓝色、绿色、红色、紫色竖线分别代表高潮、低潮、涨急、落急的时刻。

图3 冬季(a)和夏季(b) T03 潮位站实测潮位过程曲线  
Fig. 3 Tidal level time-series at station T03 in winter (a) and summer (b)

根据潮位过程曲线确定的各站定位点海流观测期间的高潮、低潮、涨急、落急 4 个时刻在图 3 中用竖线标出，对应时刻各站深度平均的实测流分布绘制在图 4 中。分析图 4 可知：冬季航次大潮期间，大亚湾湾内的 C02、C03、C05、C06、C07 站位具有明显的涨潮流（向北）和落潮流（向南），方向基本相反，其中 C07 站位处于湾中部南北向的深水槽附近，涨潮流和落潮流最强，最大深度平均涨潮流速为 32 cm/s，最大深度平均落潮流速为 34 cm/s。湾外各站位中只有 C10 站有明显的涨潮流和落潮流，最大深度平均涨潮流速为 26 cm/s，最大深度平均落潮流速为 33 cm/s。而在冬季航次小潮期间潮流整体变弱，各站位涨潮流和落潮流没有明显地沿着大潮期间的潮流主轴方向。

夏季航次大潮期间，湾内的 C03、C06、C07 站位仍然保持明显的涨潮流（向北）和落潮流（向南），其中 C07 站位仍然具有最大的涨潮流和落潮流，最大深度平均涨潮流速为 44 cm/s，最大深度平均落潮流速为 35 cm/s。湾外各站位中 C08、C09、C10 站有明显的涨潮流和落潮流，其中 C10 站位涨、落潮流最强，最大深度平均涨潮流速为 51 cm/s，最大深度平均落潮流速为 35 cm/s。而在夏季航次小潮期间，由于潮流整体变弱，湾内 6 个站位涨潮流和落潮流没有明显的沿着大潮期间的潮流主轴方向；湾外 6 个站位所有时刻都保持偏东的流向。

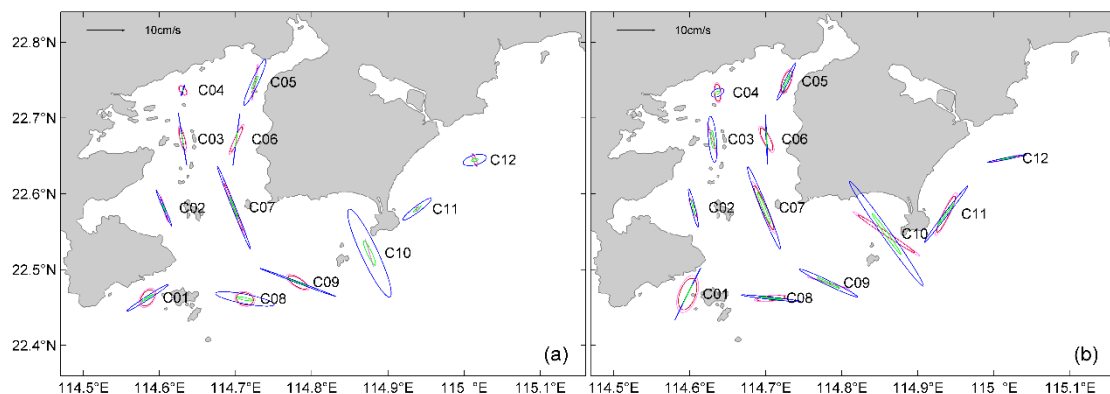


(a): 冬季大潮; (b): 冬季小潮; (c): 夏季大潮; (d): 夏季小潮。蓝色、绿色、红色、紫色矢量分别代表高潮、低潮、涨急、落急时刻的实测流。

图4 大亚湾冬季和夏季各站点高潮、低潮、涨急、落急深度平均实测流平面分布图  
Fig. 4 Depth-averaged observed current at high tide, low tide, rising tide, ebbing tide in winter and summer

## 2.2 潮流分布特征

根据观测所得的冬季和夏季各个站点流速数据,按照短期海流调和分析方法<sup>[9]</sup>,对各站点深度平均的海流时间序列进行了调和分析,得到  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$  各主要分潮的潮流调和常数 and 潮流椭圆要素特征,并在此基础上绘制了冬季、夏季各主要分潮潮流椭圆平面分布图(图5)。从潮流调和常数及椭圆半长轴长度可以看出,冬季和夏季期间潮流振幅最为显著的都为  $M_2$  分潮流,其量值整体大于其他分潮流,  $K_1$ 、 $O_1$  分潮流振幅次之,  $S_2$  分潮流振幅最弱,即观测海区以半日潮流为主,潮流的运动形式可以主要由  $M_2$  分潮流来描述,  $M_2$  分潮流体现出该海域潮流的结构特点。冬季航次期间,各站  $M_2$  分潮流的最大流速在 1~14 cm/s 之间,其中最大  $M_2$  分潮流速出现在 C10 站点;夏季航次期间,各站  $M_2$  分潮流的最大流速在 1~21 cm/s 之间,整体比冬季航次的  $M_2$  分潮流速有所增加,其中最大  $M_2$  分潮流速也出现在 C10 站点。



(a): 冬季; (b): 夏季。红色、紫色、蓝色、绿色椭圆分别代表  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$  分潮流。

图5 大亚湾冬季和夏季各站位深度平均的各分潮潮流椭圆平面分布图  
Fig. 5 Ellipse of depth-averaged tidal current components in winter and summer

根据潮流椭圆短轴和长轴的比值（称为椭圆旋转率， $K$ ）可以判别潮流的运动形式<sup>[10]</sup>。当  $K > 0.25$  时，潮流表现出较强的旋转性；而当  $K < 0.25$  时，潮流主要表现为往复流。冬季航次期间，基本上所有站位的垂直平均  $M_2$  分潮  $K$  值都满足  $K < 0.25$ ，表现为典型的往复流；仅有 C12 站位  $K$  值为 0.41，表现较强的旋转性。夏季航次期间，同样得出基本上所有站位的垂直平均  $M_2$  分潮  $K$  值都满足  $K < 0.25$ ，表现为典型的往复流；仅有 C04 站位  $K$  值为 0.55，表现较强的旋转性。因此，大亚湾及周边海区冬季和夏季的潮流运动形式主要表现为往复流。

潮流类型以主要全日、半日分潮流的比值  $F = (W_{O1} + W_{K1})/W_{M2}$  来划分<sup>[10]</sup>，其中  $F$  为潮流类型判数， $W_{O1}$ 、 $W_{K1}$ 、 $W_{M2}$  分别为  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$  分潮流的椭圆长轴。根据  $F$  值的不同，可以将潮流类型划分为 4 类： $0 < F < 0.5$  为正规半日潮流； $0.5 < F < 2.0$  为不正规半日潮流； $2.0 < F < 4.0$  为不正规全日潮流； $F > 4.0$  为正规全日潮流。根据冬季和夏季各站位深度平均的潮流类型值绘制出潮流类型平面分布图（图 6）。冬季航次期间，基本上所有站位的垂直平均潮流性质都在  $0.5 < F < 2.0$  范围内，属于不正规半日潮流，其中  $F$  值最大值为 1.80，出现在 C04 站；在此范围内的  $F$  值最小值为 0.56，出现在 C10 站。仅有 C11 站  $F$  值为 0.22，处在  $0 < F < 0.5$  范围内，属于正规半日潮流。夏季航次期间，基本所有站位的垂直平均潮流性质都在  $0.5 < F < 2.0$  范围内，属于不正规半日潮流。仅有 C04 站  $F$  值为 2.76，表现为不正规全日潮流； $F$  值最小值为 1.00，出现在 C02 站。由此可见，大亚湾及周边海区的潮流整体表现为不正规半日潮流，其中 C04 站位处于大亚湾的湾顶，潮流较弱，两个季节的观测均得出该站位潮流性质  $F$  值最大，潮流性质在不正规半日潮和不正规全日潮两个范围内变动。

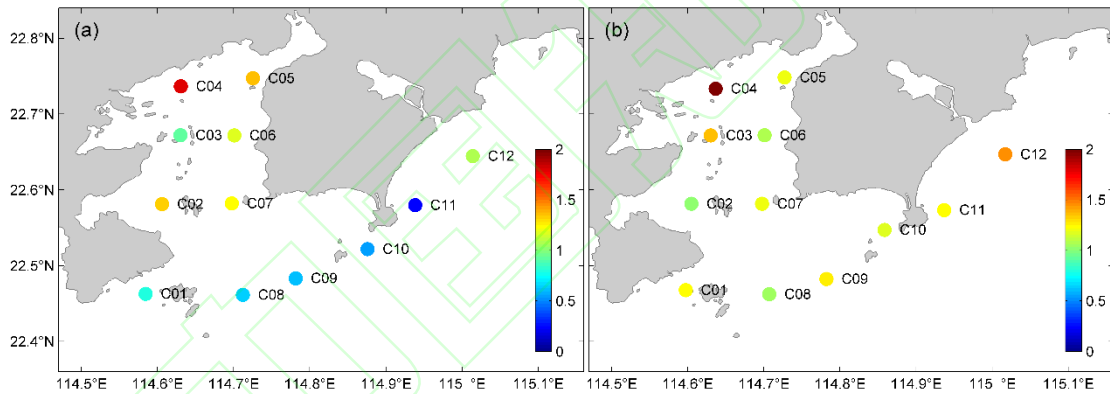
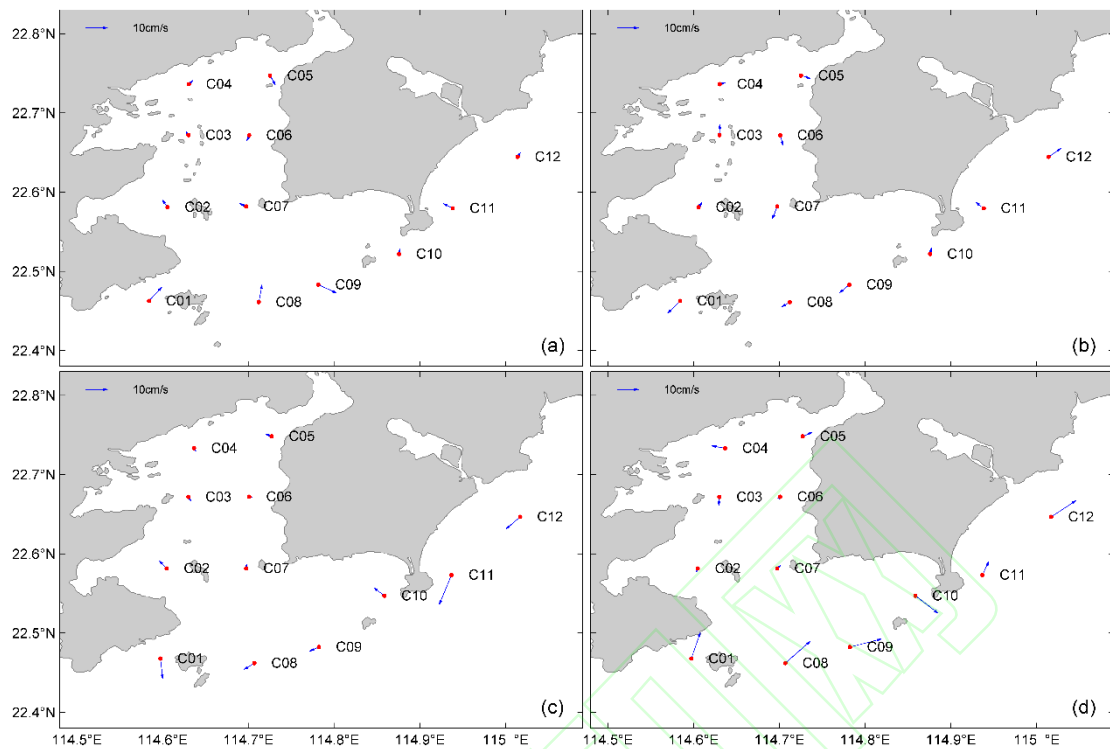


图6 大亚湾冬季(a)和夏季(b)各站位深度平均的潮流类型平面分布图  
Fig. 6 Tidal current type in winter (a) and summer (b)

### 2.3 余流分布特征

各站位实测海流时间序列经过调和分析，去除各个分潮潮流的成分，得到大亚湾及其周边海区冬季和夏季大潮期、小潮期余流的平面分布特征（图 7）。由于该海区没有较大的河流径流影响，因此余流分布主要由海面风场、外海环流、潮致余流等因素驱动。





(a): 冬季大潮; (b): 冬季小潮; (c): 夏季大潮; (d): 夏季小潮。

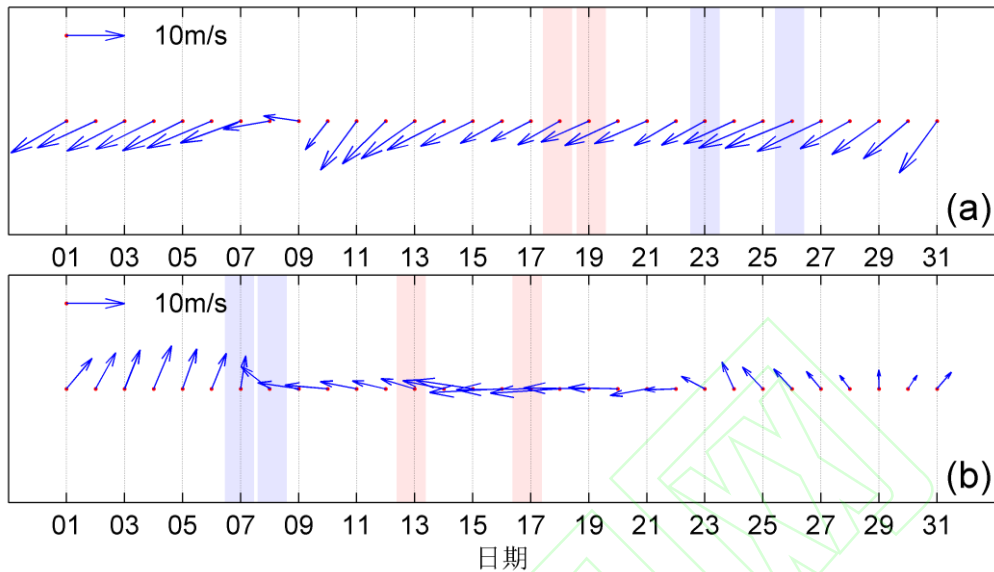
图7 大亚湾冬季和夏季各站位深度平均的余流平面分布图  
Fig. 7 Depth-averaged residual current in winter and summer

冬季大潮和小潮期间, 大亚湾湾内的余流都具有明显的反气旋环流特征, 虽然其流速较弱, 但湾内6个站位流向所显示出的反气旋特征稳定。大潮期间湾内6个站位垂直平均余流流速在2~5 cm/s之间, 最小余流出现在C03站位, 最大余流出现在C05站。小潮期间6个站位的垂直平均余流流速有所增加, 流速值为2~6 cm/s, 最小余流出现在C04站, 最大余流出现在C07站。湾口东部的C10和惠东以东沿岸的C11、C12站位在大潮、小潮期间余流也基本保持一致, 流向均为偏北向, 小潮期间的流速较大潮期间余流有所增加。湾口的3个站位(C01、C08、C09)余流在大潮、小潮两个潮期有明显的变化。大潮期间3个站位整体余流方向偏东或偏北, 且余流流速为8~9 cm/s; 而小潮期间3个站位余流都转变为西南向, 余流流速为4~8 cm/s, 流速有所减小。

夏季大潮和小潮期间, 湾内6个站位的余流流速整体较弱, 且没有稳定的余流结构特征, 不存在冬季所表现出的反气旋环流。大潮期间余流流速在0~5 cm/s之间, 小潮期间余流流速在0~6 cm/s之间。湾口和惠东以东的6个站位在大潮和小潮期间余流流向发生显著的变化, 大潮期间6个站位垂直平均余流流向基本偏西或偏南, 余流流速在4~15 cm/s之间; 小潮期间6个站位垂直平均余流流向则完全相反, 转变为偏东或偏北向, 流速在7~15 cm/s之间。

综上所述, 该海区余流随着季节和大、小潮的变化存在显著的变化。考虑到余流的分布受到海面风场的显著影响, 计算了冬季和夏季观测期间的大亚湾周边海区平均的遥感海面风场时间序列(图8)。2018年1月期间, 大亚湾周边海区处于较稳定的东北季风影响下, 平均海面风速在10 m/s以上。但在1月7日—9日期间存在一个较短的天气过程, 风速由东北季风转变为弱东风, 随后再次转变为正常的东北季风。航次观测的大潮到小潮期间, 都处在东北季风的控制之下, 但风速是逐渐增强的过程, 大潮期间风速约为8 m/s, 小潮期间增强为12 m/s左右。2018年7月期间, 该海区海面风场的时间序列有较大的变化。7月1日—6日期间该海区处于正常的西南季风的控制下, 风速约为10 m/s。但台风“玛莉亚”于7月4日在菲律宾以东的洋面形成, 7月11日在福建连江沿海登陆, 登陆时中心附近最大风力14级。受此台风影响, 大亚湾周边海区7月8日转变为东风和东南风, 并一直持

续到 28 日左右, 风速在 8 m/s 左右。因此夏季航次的小潮观测期基本处于正常的西南季风影响下, 而大潮期则处于台风造成的东风影响下。



(a): 2018 年 1 月; (b): 2018 年 7 月。红色阴影: 大潮观测期; 蓝色阴影: 小潮观测期。

图 8 ASCAT 卫星遥感的区域平均 (114.0°E~115.5°E, 21.5°N~23.0°N) 海面风矢量时间序列  
Fig. 8 Area averaged (114.0°E~115.5°E, 21.5°N~23.0°N) ASCAT surface wind vector time-series

大亚湾湾口和惠东以东近海的 6 个站位处于粤东沿岸流的边缘, 周边海区风场的季节和天气过程转换可影响大亚湾外海环流的变化, 因此本文观测期间该 6 个站位的余流垂直剖面 (图 9) 也随季节和天气过程有显著响应。冬季航次的大潮和小潮期间, 湾口和惠东以东的 C10、C11、C12 站位剖面余流流速都较为微弱, 且流向保持稳定。但 C01、C08、C09 站位剖面余流流速较强, 大潮期间最大余流出现在 C09 站的 0.6H 层, 流速值约为 14 cm/s, 3 个站位均体现出中层余流最大、近表层和近底层余流流速次之的剖面特征; 小潮期间的最大余流出现在 C01 站的近表层, 流速值约为 15 cm/s, 3 个站位均体现出近表层余流最大、中层减弱、近底层最小的剖面特征。该 3 个站位大潮和小潮余流的变化应该与周边海区观测期间西南季风逐渐增强的天气过程有关。

夏季航次的大潮和小潮期间, 湾口和惠东以东 6 个站位的余流较强, 大潮期间最强余流出现在 C11 站的 0.2H 层, 流速值为 22 cm/s; 小潮期间最强余流出现在 C10 近表层, 流速值为 18 cm/s。大潮和小潮期的余流都表现出近表层流速最大、中层和近底层逐渐减弱的剖面特征。小潮期间处于西南季风的控制之下, 6 个站位的余流流向均为东北或偏东方向, 与该海区的粤东沿岸流一致; 但在台风造成的东风影响下, 大潮期间 6 个站位余流流向均转变为偏西向、西南向或偏南方向, 由此可见该海区环流随风场和天气过程的响应显著。

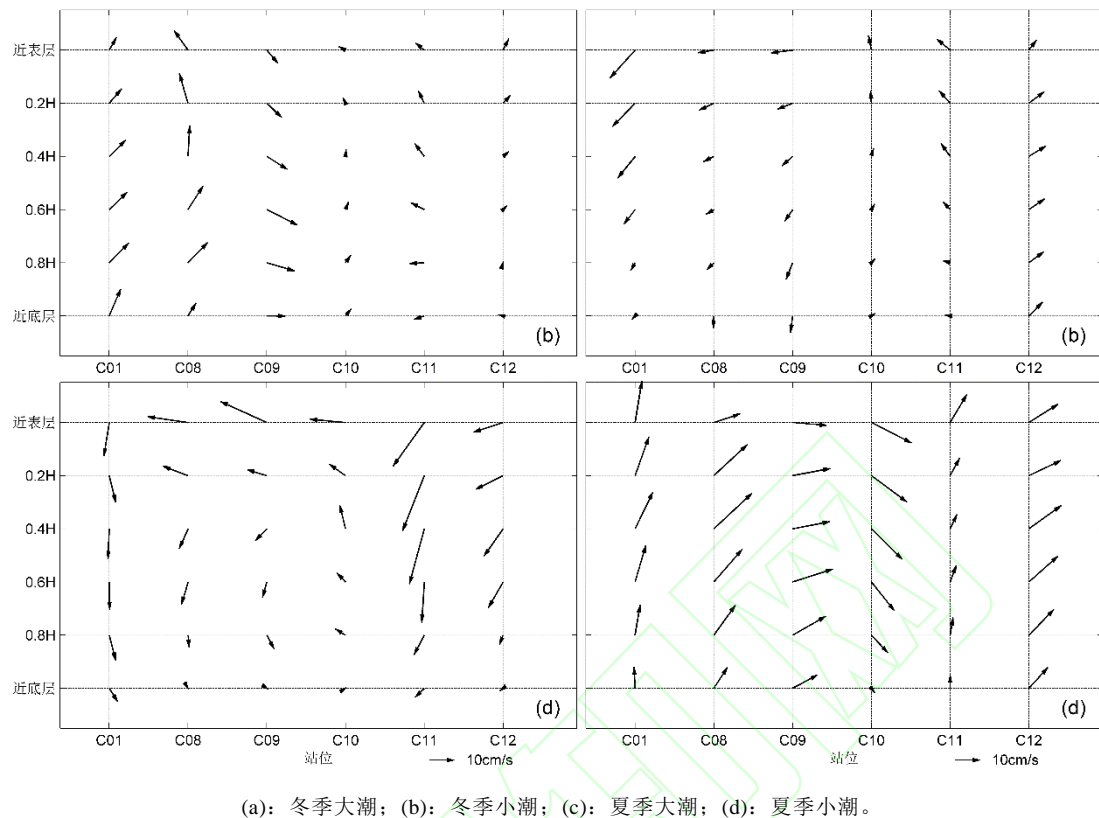


图9 冬季和夏季大亚湾湾口6个站位的余流剖面分布图  
Fig. 9 Profile distribution of residual current on the 6 stations at the mouth of Daya Bay in winter and summer

### 3 讨论

由 2.2 节的分析结果可知, 观测海区冬季和夏季潮流振幅最强的分潮均为 M<sub>2</sub> 分潮, 基本上所有站位的垂直平均潮流性质都在  $0.5 < F < 2.0$  范围内, 潮流整体表现为不正规半日潮流。该结论与杨国标<sup>[4]</sup>和吴仁豪等<sup>[5]</sup>的现场观测和数值模拟结果一致, 但对比可知冬季和夏季两个航次的潮流性质在具体量值上具有一定程度的差异, 本文的结果和杨国标<sup>[4]</sup>所采用的调查结果在个别站位也存在明显差异。造成该差异的可能因素有潮流性质的季节变化、观测期间变化的天气过程造成的海流扰动等, 可见对该海区潮流性质的了解依靠单个航次的调查结果仍然不够, 需要尽可能综合多个航次不同时段的观测资料, 甚至长期连续锚系观测数据和数值模型等。

由 2.3 节的分析结果可知, 大亚湾湾内海区在冬季两个潮期的余流都表现出反气旋环流特征, 虽然其流速仅有 2~6 cm/s, 但余流的反气旋结构是显著的; 夏季的余流则没有这种结构特征。该结论与李立等<sup>[6]</sup>基于锚系潜标的观测结果一致, 且由于本文中设置有 6 个定点站位较完整的覆盖大亚湾湾内海区, 该反气旋环流的结构可以更加完整的体现。由于大亚湾内部没有大的径流输入, 且此环流结构具有显著的季节性, 因此其驱动机制可以排除径流余流、潮致余流的可能, 而应归因于冬季季风和外海环流的作用。该环流结构对于大亚湾内部与外部的水体交换及其自净化能力有重要的意义。一般港湾内外海水的交换速率与潮流流速、纳潮量、余流等因素有关。大亚湾内部整体潮差较小, 潮流较弱, 特别是以 C04 站为代表的湾顶海区 M<sub>2</sub> 分潮最大流速仅有 1 cm/s, 潮流自身的水体交换能力较弱; 而冬季稳定的反气旋余流可以将湾顶的水体持续循环至湾口海区, 因此可以明显的改善其与外海的水体交换。

### 4 结论

通过对大亚湾及其周边海区进行全面的冬、夏两季和大潮、小潮定点站位的海流准同步观测, 同

时辅以潮位同步监测和卫星遥感海面风场资料, 本研究得出研究海区的潮流和余流具有以下几个特征:

1) 大亚湾及周边海区潮差较小, 因此冬季和夏季整体实测流速较弱, 夏季的潮差和潮流略大于冬季。大潮期间部分站位的实测流表现出明显的涨、落潮流特征, 但小潮期间在余流和其他因素的掩盖下涨潮流和落潮流特征不明显。

2) 潮流的调和分析表明该海区冬季和夏季潮流振幅最强的分潮为  $M_2$  分潮,  $K_1$ 、 $O_1$  分潮流振幅次之,  $S_2$  分潮流振幅最弱。基本上所有站位的垂直平均潮流性质都在  $0.5 < F < 2.0$  范围内, 因此大亚湾及周边海区的潮流整体表现为不正规半日潮流。

3) 冬季和夏季期间, 计算得出基本所有站位的垂直平均  $M_2$  分潮椭圆旋转率都满足  $K < 0.25$ , 因此大亚湾及周边海区潮流运动形式主要表现为往复流, 仅有个别站位例外。

4) 冬季的大潮和小潮期间, 大亚湾湾内海区的余流都表现出反气旋环流特征, 虽然其流速较弱, 但余流的流向体现出的反气旋结构明显且稳定。夏季的大潮和小潮期间余流分布则没有这种结构特征。

5) 大亚湾湾口和惠东沿岸海区的余流受季节和天气过程影响显著。在夏季期间正常的西南季风可以维持稳定的东北向余流, 但台风或其他因素造成的天气过程可以使余流整体发生转向。

致谢: 感谢惠州市海洋技术中心梁浩亮等对本调查研究的支持, 感谢参加冬、夏季航次现场调查的所有调查队员。

#### 参考文献:

- [1] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第九分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 403.
- [2] YE Y, CHEN K, ZHOU Q, et al. Impacts of thermal discharge on phytoplankton in Daya Bay[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 83(SI): 135-147.
- [3] 黄伟生, 纪红兵. 惠州大亚湾石化工业区环境保护现状与策略分析[J]. 化学工业, 2012, 30(1/2): 53-56.
- [4] 杨国标. 大亚湾海区潮流运动特征[J]. 人民珠江, 2001(1): 30-32.
- [5] 吴仁豪, 蔡树群, 王盛安, 等. 大亚湾海域潮流和余流的三维数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(3): 18-23.
- [6] 李立, 张炳楷, 曾刚. 大亚湾的海流特征[C]//黄宗国, 吴启泉, 顾德宇. 大亚湾海洋生态文集(II). 北京: 海洋出版社, 1990: 507.
- [7] ZHANG H, CHENG W, CHEN Y, et al. Importance of large-scale coastal circulation on bay-shelf exchange and residence time in a subtropical embayment, the northern South China Sea[J]. Ocean and Coastal Management, 2019, 168: 72-89.
- [8] RICCIARDULLI L, WENTZ F J. Remote sensing systems ASCAT C-2015 daily ocean vector winds on 0.25 deg grid, version 02.1[R]. Santa Rosa, CA: Remote Sensing Systems, 2016.
- [9] 国家海洋信息中心. 海洋调查规范第7部分 海洋调查资料交换: GB/T 12763. 7—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [10] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 293.